



TITLE:

分散電源の導入された負荷電力系統におけるSMESの有効利用

AUTHOR(S):

白井, 康之

CITATION:

白井, 康之. 分散電源の導入された負荷電力系統におけるSMESの有効利用. 2004

ISSUE DATE:

2004-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/77949>

RIGHT:

p.17-96は学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

分散電源の導入された負荷電力系統における
S M E S の有効利用

課題番号 (1 3 6 5 0 3 0 6)

平成 1 3 ～ 1 5 年度 科学研究費補助金

基盤研究 C (2)

研究成果報告書

平成 1 6 年 3 月

研究代表者 白井 康之

(京都大学大学院エネルギー科学研究科)

分散電源の導入された負荷電力系統における
S M E S の有効利用

課題番号 (1 3 6 5 0 3 0 6)

平成 1 3 ～ 1 5 年度 科学研究費補助金

基盤研究 C (2)

研究成果報告書

平成 1 6 年 3 月

研究代表者 白井 康之

(京都大学大学院エネルギー科学研究科)

目次

はじめに	・・・ 1
研究組織	・・・ 2
研究経費	・・・ 2
研究発表	・・・ 2
研究成果	・・・ 4
1. SMESを利用した分散電源を含む配電系統の運転状態把握	・・・ 4
1. 1 はじめに	・・・ 4
1. 2 超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES)	・・・ 4
1. 3 実験系統	・・・ 4
1. 4 チャープ信号に対する MEM による解析	・・・ 5
1. 5 システム同定による配電系統の縮約情報取得	・・・ 6
2. 分散電源を含む需要地系統での SMES の有効利用	・・・ 9
2. 1 非回転系発電機が連系された配電系統の運転状態把握	・・・ 9
2. 2 SMES を 2 機用いた負荷変動補償と運転状態把握	・・・ 10
2. 3 部分負荷系統の運転状態把握	・・・ 11
2. 4 SMES を用いた負荷系統の自立運転への移行	・・・ 12
3. まとめ	・・・ 13
研究発表論文	・・・ 15

はじめに

将来のエネルギー需給に関しては、需要の多様化、電源の多様化・分散化などが進んでいくと考えられ、これらに対応した柔軟なエネルギーシステムを樹立することが重要な課題となってくる。循環型エネルギーや、環境保全という社会のニーズに対して、自然エネルギーや未利用エネルギーの開発利用、熱併給による総合エネルギー効率の向上などの観点から、電気エネルギーシステムにおいては、ベースエネルギー電源に加えて、より小型で制御性に富む分散型エネルギーシステム（太陽光発電設備や燃料電池発電、マイクロガスタービン発電、風力発電など）の開発・導入が加速されていくものと考えられる。しかし、今後導入が進めばシステムの運用管理に影響を与えることが予想されるため、分散エネルギーの導入可能容量や導入インパクト、連系条件、運用方法、さらには新たな系統形態・運用形態などのシステム的な検討が必須である。

本研究では、このような分散電源を含み、高効率エネルギー貯蔵機器や電力制御機器、系統制御機器を持つ新たな需要地システムを想定し、超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) を代表とする電力制御装置を用いて、系統状態把握や安定度維持、供給信頼度向上などに関して新たな利用法を提案し、電力系統シミュレータを用いた実験によって有用性、効果などを検討した。

その結果、非回転系発電機(Non-RG: Non Rotary Generator)が配電系統に連系された場合の SMES を用いた配電系統の運転状態把握に関して、回転型あるいは非回転型分散型発電機の台数、設置位置・構成、配電系統の電圧分布、など様々な状態を考え、潮流、電圧、慣性による固有周波数の変化について考察した。配電用変電所に設置された SMES からの微小な電力変動に対する配電系統の応答から、設置されている分散電源の構成や電圧プロファイルなど運用状態の把握がある程度可能で有用であることが、電力系統シミュレータを用いた模擬実験によって確認された。さらに、分散電源を含む負荷系統において、上位系統での事故によって切り離されたときの単独運転検出、および高速電力制御機器による自立運転への移行実験などを行い、その有用性を確認した。

研究組織

研究代表者 : 白井 康之 (京都大学大学院エネルギー科学研究科 助教授)

研究経費

平成13年度	1, 700千円
平成14年度	600千円
平成15年度	600千円
計	2, 900千円

研究発表

学術誌・国際会議録

1. Y. Shirai, T. Nitta, "On-line Grasp of Dynamic Stability of Power System by Use of Superconducting Magnet Energy Storage", Conference Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Vol. 3, pp. 1548-1553, Oct. 2002
2. Y. Shirai, T. Nitta, M. Yamada, "Experimental Study on System Stability Evaluation in Parallel Running of a Superconducting Generator and a SMES", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 890-895, March 2002.
3. Y. Shirai, T. Nitta, "On-Line Evaluation of Power System Stability by Use of SMES", Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2002 Winter Meeting, Vol. 2, pp. 900-905, Jan. 2002.
4. Yasuyuki Shirai, Shinji Takeda, Koichi Sato, Tanzo Nitta, Akira Uemura, Yoichiro Miyake, Hidetoshi Nishigaito, "ON-LINE GRASP OF LOAD SYSTEM CONDITIONS WITH DISTRIBUTED GENERATORS BY USE OF SMES", Proceedings of 14th PSCC, Sevilla, Session 20, Paper4, June 2002.
5. A. Uemura, T. Nitta, T. Yamashita, Y. Shirai, S. Takeda, K. Sato, "Experimental Study on in Real Time Simulation on On-line Identification of Multi-Machine Power System by Use of SMES", Proceedings of International Conference on Electrical Engineering, Vol. I, pp. 38-42, July 2002.
6. Y. Shirai, S. Takeda, S. Mohri, T. Nitta, H. Nishigaito, "Experimental Study on On-line Measurement of Eigen-Modes of Longitudinal Multi-Machine Power System by Use of SMES", Proceedings of International Conference on Electrical Engineering, Vol. I, pp. 197-202, July 2002.

口頭発表

1. 上村明, 三宅陽一郎, 仁田旦三, 白井康之, 竹田晋二, “SMES による電力系統の状態把握を利用した制御系の定数調整”, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-01-137, PSE-01-131, pp. 55-58, 2001.
2. 竹田晋二, 白井康之, 佐藤晃一, 仁田旦三, 三宅陽一郎, 上村明, 西垣内秀俊, “分散電源を含む負荷電力系統の SMES を用いた状態把握について”, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-01-138, PSE-01-132, pp. 59-64, 2001.
3. 佐藤晃一, 白井康之, 竹田晋二, 仁田旦三, 三宅陽一郎, 上村明, 西垣内秀俊, “分散電源の連系された配電系統の SMES による運転状態把握について”, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-02-142, PSE-02-152, pp. 1-6, 2002.
4. 中丸成人, 白井康之, 仁田旦三, 山下武健志, 柴田勝彦, “SMES を用いた負荷系統の自立運転への移行”, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-03-25, PSE-03-36, pp. 1-6, 2003.
5. 山下武健志, 三宅陽一郎, 仁田旦三, 白井康之, “SMES を用いた電力系統の運伝状態把握に関する研究”, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-03-27, PSE-03-38, pp. 13-18, 2003.
6. 上村明, 仁田旦三, 毛利哲, 白井康之, 竹田晋二, “SMES を用いた電力系統の制御装置のオンライン検証”, 平成 13 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.480-481, 2001.
7. 竹田晋二, 白井康之, 塩津正博, 仁田旦三, 毛利哲, 上村明, 西垣内秀俊, “分散電源を含む需要地系統の SMES による状態把握に関する検討”, 平成 13 年電気学会電力・エネルギー部門大会 講演論文集, 256, pp. 713-714, 2001.
8. 佐藤晃一, 白井康之, 竹田晋二, 仁田旦三, 三宅陽一郎, 上村明, 西垣内秀俊, “分散電源を含む負荷系統の SMES を用いた状態把握に関する一考察”, 平成 14 年電気学会全国大会講演論文集, 6-077, No. 6, pp. 138-139, 2002.
9. 上村明, 仁田旦三, 山下武健志, 白井康之, 竹田晋二, 佐藤晃一, “SMES を用いたチャープ信号状電力変動による多機系統のオンライン固有値推定”, 平成 14 年電気学会全国大会講演論文集, 6-007, No. 6, pp. 11-12, 2002.
10. 三宅陽一郎, 仁田旦三, 佐藤晃一, 竹田晋二, 白井康之, 石井敏則, 木村博伸, 林秀美, “1kWh/1MW モデル型 SMES による電力系統の状態把握実験の解析(I)”, 平成 15 年電気学会全国大会予稿集, 6-094, pp. 157-158, 2003.
11. 中丸成人, 白井康之, 佐藤晃一, 仁田旦三, 西垣内秀俊, “分散電源を含む負荷系統に設置された SMES による部分系統の運用状態の抽出について”, 平成 15 年電気学会全国大会予稿集, 6-258, pp. 438-439, 2003.

研究成果

1. SMESを利用した分散電源を含む配電系統の運転状態把握

1. 1 はじめに

現在の電力系統では、電力事業の規制緩和にともない電力系統の負荷側に分散電源が増加する傾向にある。また、太陽光発電など家庭単位で発電設備を持つことも考えられる。これら分散電源等の増加にともない、系統に逆潮流が発生するなど系統の構成はますます複雑化している。現在までに主幹系統側においては、安定性の解析は広く行なわれてきているが、配電系統側の安定性解析についてはあまり重要視されていない。しかし、上述したように分散電源等が導入された系統では、%分散電源の存在しない系統に比較すると、発電機を含むために電圧の安定性が問題になるなど、その運転状態の把握が非常に重要になると考えられる。

そこで本研究では分散電源を含む配電系統を対象に、配電系統の状態把握を、超電導エネルギー貯蔵装置(SMES:Superconducting Magnetic Energy Storage)を用いて行なうことを提案し、電力系統シミュレータを用いて実験を行なった。

1. 2 超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)

SMESは超電導を利用したエネルギー貯蔵用の電力機器で系統には、サイリスタやGTOなどで構成されたダブルブリッジを介して設置される。SMESの特徴としては、超電導を利用しているので低損失、高インピーダンスであるため系統に設置しても系統状態を変化させない、系統との間で高速な電力制御が可能といったことが上げられる。

従来系統の状態把握には負荷脱落などの系統擾乱に対する偶発的な過渡応答を解析することによる系統的な把握手法が用いられている。これに対してSMESを用いてSMESから系統に電力変動を与えた場合には、SMESが高インピーダンスであるため系統に対して独自の外力として機能できるために、系統状態を変化させずに状態把握を行なうことが可能である。以上のようなSMESの特徴を本研究に利用した。

1. 3 実験系統

今回電力系統シミュレータを用いて構成した実験系統を図1に示す。また、実験条件を表1に示す。主系統から連系線を介して分散電源を含んだ配電系統が繋がっており系統容量は800kVAである。負荷の消費電力は400kW一定とし、分散電源G1~G3の出力、分散電源数等をパラメータとし表に示すいくつかの条件について解析を行なった。なおSMESの設置点は実験を通してBusAとする。

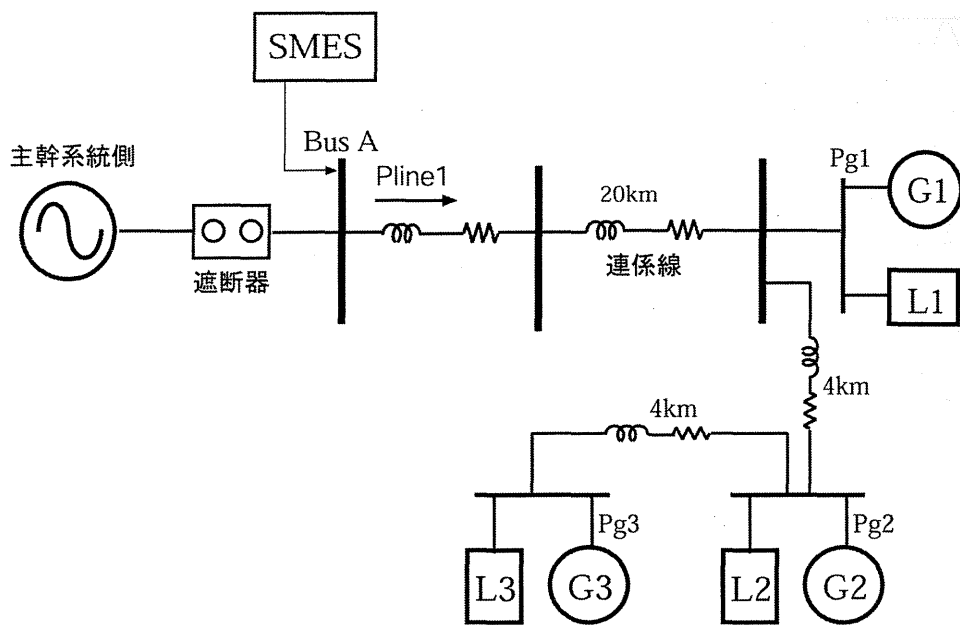


図1 システムシミュレータで構成した実験系統図

表1 実験条件

	G1(kW)	G2(kW)	G3(kW)
case1	400	400	400
case2	400	400	×
case3	400	0	×
case4	800	400	×

負荷の消費電力はどれも 400kW 定インピーダンスである

1. 4 チャープ信号に対する MEM による解析

SMES から系統に与える電力信号をチャープ状の有効電力信号とし、20 秒間で周波数が 0 から 3Hz まで変化する信号とした。電力振幅は 0.3p.u.(240kW)としている。(このとき無効電力は 0 とした。) case1 の生データを図 2 に、そのデータを MEM により解析したものを図 3 に示す(MEM により解析したデータは最大値を 1 として規格化した)。

図 2 を見ると送電線の電力 Pline1、発電機の電力 PG1、PG2、PG3 が SMES のチャープ入力信号のある周波数の部分で動揺していることが確認できる。これを MEM 法により解析すると図 3 のようになり、周波数がおおよそ 1.3Hz ほどの部分にピークが現れている。

これより、系統の固有周波数が 1.3Hz であることが分かる。

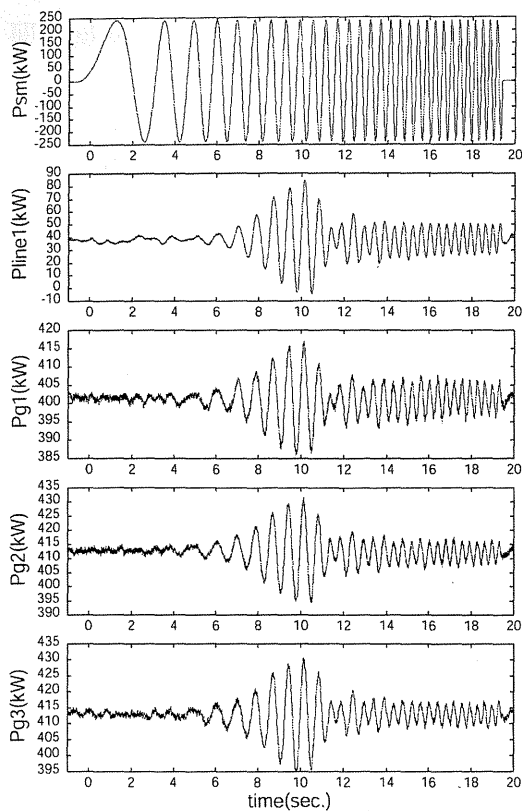


図2 SMESの有効電力チャープ信号に対する系統の応答(case1)

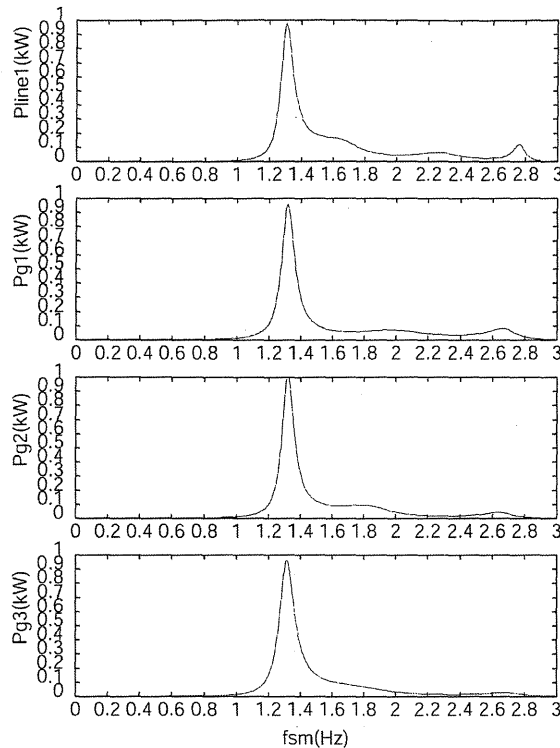


図3 case1の系統応答のMEM解析結果

1. 5 システム同定による配電系統の縮約情報の取得

現在の電力系統の運用では多くの場合、負荷の特性を定インピーダンスとして考えている。しかし、実際の負荷においては負荷のインピーダンスは一定ではなく、様々な要因により変動する。現在考えられている負荷モデルの多くが、負荷端の電圧変動によって負荷の消費電力が変動するという考え方に立っているが、実際には上述したように負荷のインピーダンス変化によって負荷の消費電力が変動するといったことが起こる。

一機無限大母線系統におけるシステム同定を用いた系統の状態把握に関してはすでに報告がされている。そこで、ここでは最終的な目的を負荷の動特性把握として、負荷の特性をSMESのチャープ信号電力に対する伝達関数として求めることを試みた。SMESの入力信号は系統においては負荷の脱調などの変動であるとみなすことができる。すなわち、系統に起こった電力動揺に対する負荷の特性を求めることになる。

今回はシステム同定のモデルとしてARXモデルを用いた。SMESのチャープ電力を入力とし、送電線の電力変動を出力と考えたモデルを考える。ここでcase1の結果(有効電力を用いたもの)を用いて同定を行い次の伝達関数を得た(サンプリング周期は20msec.である)。

$$G(s) = \frac{-0.03965(s^2 - 0.9089s + 18.36)}{(s^2 + 1.267s + 67.18)}$$

この伝達関数による同定波形と元のデータ波形を図4に示す(システム同定では変動分に対する同定となるので図の波形では変動分のみ表示である(以下同様))。これを見ると実験波形と同定波形が一致しており、得られた伝達関数によりシステムの同定がうまくできていると考えられる。

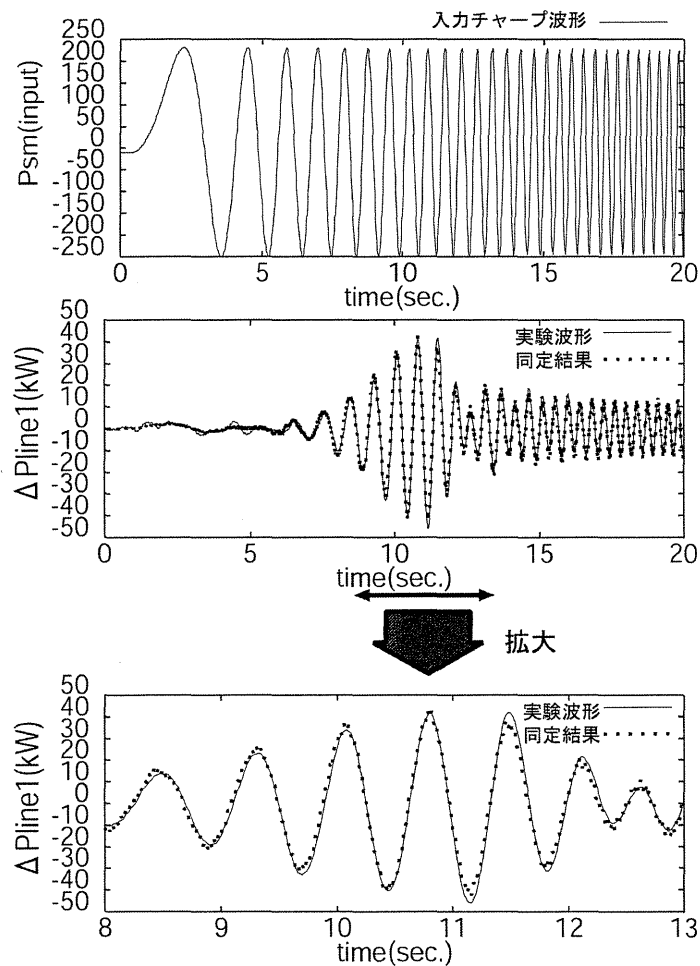


図4 Psm チャープによる Pline1 の同定結果

同様に表1の case2, case3, case4 の場合において SMES の有効電力チャープ信号を入力とし、発電機の電力 Pline1 を出力とした伝達関数を求め、同定結果が実験波形にほぼ一致しており伝達関数が適切に求められることを確認した。また case1~case4 の伝達関数の極(システムの固有値)は、表2のようになった。

表 2 伝達関数の極の値

	固有値
case1	$-0.6335 \pm j8.172$
case2	$-0.8520 \pm j8.332$
case3	$-0.8720 \pm j8.830$
case4	$-0.762 \pm j8.177$

伝達関数の極はシステムの固有値であり、固有値の実部は制動係数、虚部は同期化力に関する項であるため実部が負であるほど動揺は抑えられ、制動力が強く、虚部が大きいほど同期化力が大きく動揺の収束が速い。すなわち case1~case4 の固有値を比較すると負荷系統がどのような運転状態に移行したのかを確認することができる。

そこで表 2 に示した固有値を s 平面上にプロットしたものを図 5 に示す。s 平面上では虚部が大きく、実部が負の領域が安定領域であり、平面上を左上へいくほど安定となる。特に case2,case3,case4 の場合に注目するとそれぞれの潮流状態が

- case2 送電線潮流 Pline1 が 0kW
- case3 送電線潮流 Pline1 が上位系統から負荷系統へ 400kW
- case4 送電線潮流 Pline1 が負荷系統から上位系統へ 400kW(逆潮流)

となっていることと、図 5 から逆潮流状態に移行するにつれて系統の安定度は低下しているということが分かる。

以上より、SMES から系統に与えるチャープ電力信号を入力とし、送電線電力 Pline1 を出力とした伝達関数を求めることにより固有値が求まり、負荷系統の状態を把握できることが示された。とくに分散電源の状態による系統の変化を捉えられていることから、分散電源が増加し、負荷系統がダイナミックに変動する場合においては本手法は有効な負荷状態把握法であると言える。

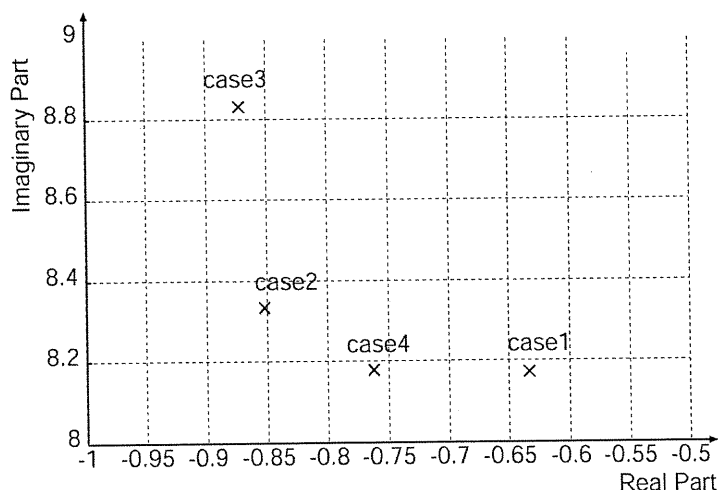


図 5 固有値の s 平面上へのプロット

2. 分散電源を含む需要地系統でのSME Sの有効利用

電力系統シミュレータを用いて回転機および非回転機の分散電源を含む負荷系統を構築し、ここに高速な電力制御が可能な機器（ここではSME S）を導入して、分散電源を含む負荷系統の運転状態の推定や自立運転への移行実験などを行った。

2. 1 非回転系発電機が連系された配電系統の運転状態把握

現在の動向を考えると今後、配電系統内には太陽光発電や燃料電池、風力発電等がインバータを通して系統に連系する数はますます増えるものと推測される。

そこで非回転機系発電機のモデルを作成し、それを図6に示すモデル配電系統内に入れて実験を行った。同期発電機モデルSG1~SG3のうち、SG1あるいはSG2をインバータ電源と置き換えた。非回転機系発電機モデルとして今回はまずインバータを考慮せずに慣性をもたない、出力を一定に保つものを用いた。

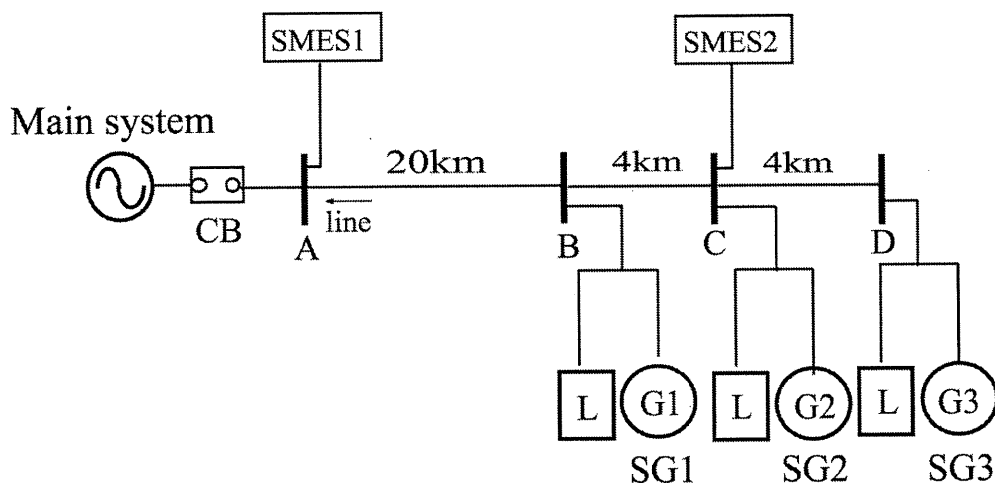


図6 電力系統シミュレータを用いた非回転機型分散電源を含む負荷電力系統モデル

この系統で、SME S 1のみを用いて有効電力あるいは無効電力の正弦波状微小励振を与え、それに対する系統応答（配電連系線の変電所端電力潮流変動）をモニターして解析することで、変電所端から見た下位配電系統の運転状態を把握する試みである。

実験結果を図7に示す。実験結果より非回転機系発電機が系統内に含まれる場合と、含まれない場合とでは系統からの応答を解析した際に違いが見られることがわかる。また非回転発電機の設置位置が異なる場合においても応答が異なっている。このことから非回転機系発電機が系統内に設置された場合においても、提案の手法を用いることにより系統の運転状態を把握することが可能であると考えられる。

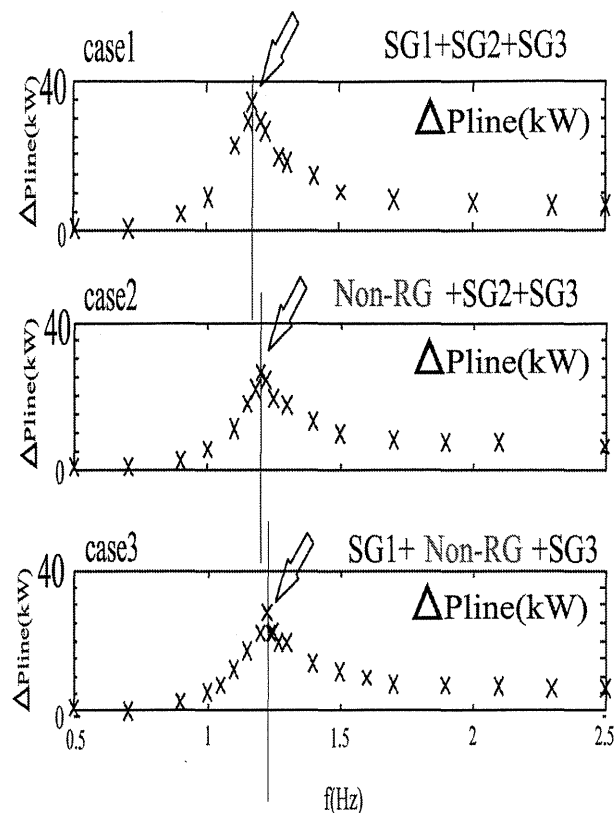


図 7 非回転機型発電機の導入とその位置による系統連系配電線潮流の動揺モードの変化

2. 2 SMES を 2 機用いた負荷変動補償と運転状態把握

提案の手法では配電系統の運転状態を把握することはできるが、SMES から系統に与えた微小電力変動が上位系統に分流することから、これを上位系統から見た場合、負荷変動とみなされる。そこで SMES を 2 機用いて一方の SMES 1 で負荷変動補償を行い、もう一方の SMES 2 で微小電力変動を与えることにより上位系統に変動を与えずに系統の運転状態を把握することを行った。

前項と同様の系統図において、SMES1 で負荷変動補償を行い SMES2 で微小電力変動 (chirp 信号: 正弦波周波数成分がある時間スパンで直流から任意周波数まで連続的に変化する信号) を与える。SMES1 では負荷変動補償として上位系統に変動が伝わらないように制御を行い、その結果として配電系統の応答情報を含むと考えられる SMES1 の電力補償出力を mem 解析して状態把握を行った。

実験結果を図 8 に示す。このように本実験の実験結果は、以前に行った SMES1 台での実験の結果と一致しており、負荷系統の運転状態を把握することが可能である。また上位系統への電力変動は SMES1 によって良好に抑制されていることを確認した。他の系統への影響を小さくした適用が可能であることを確認した。

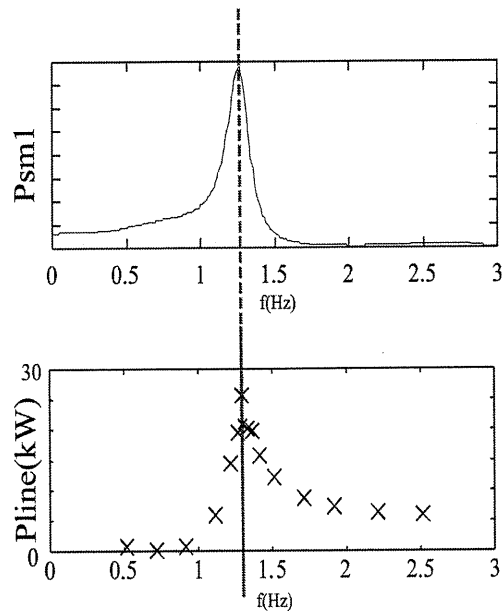


図 8 負荷変動補償信号による検出動揺モード（上）と系統連系配電線潮流による検出モード意（下）

2. 3 部分負荷系統の運転状態把握

本実験では負荷系統の運転状態をより細かく正確に把握することを目的として実験を行った。実験系統を図 9 に示す。

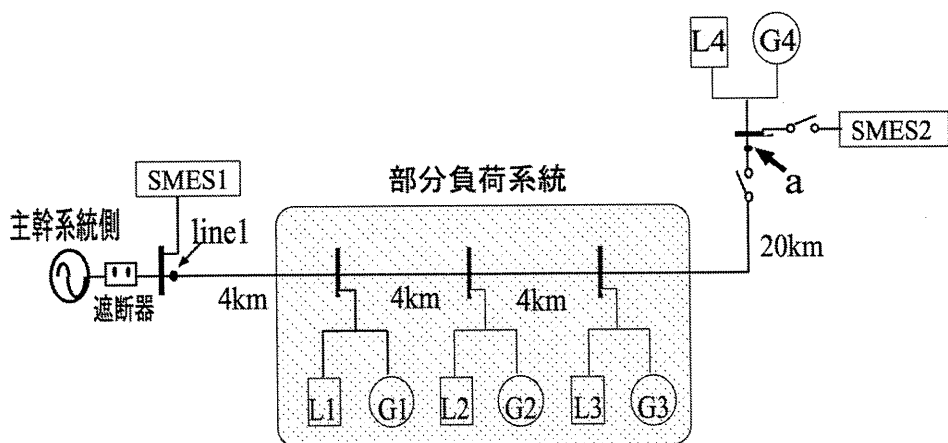


図 9 部分負荷系統の運転状態把握実験モデル系統

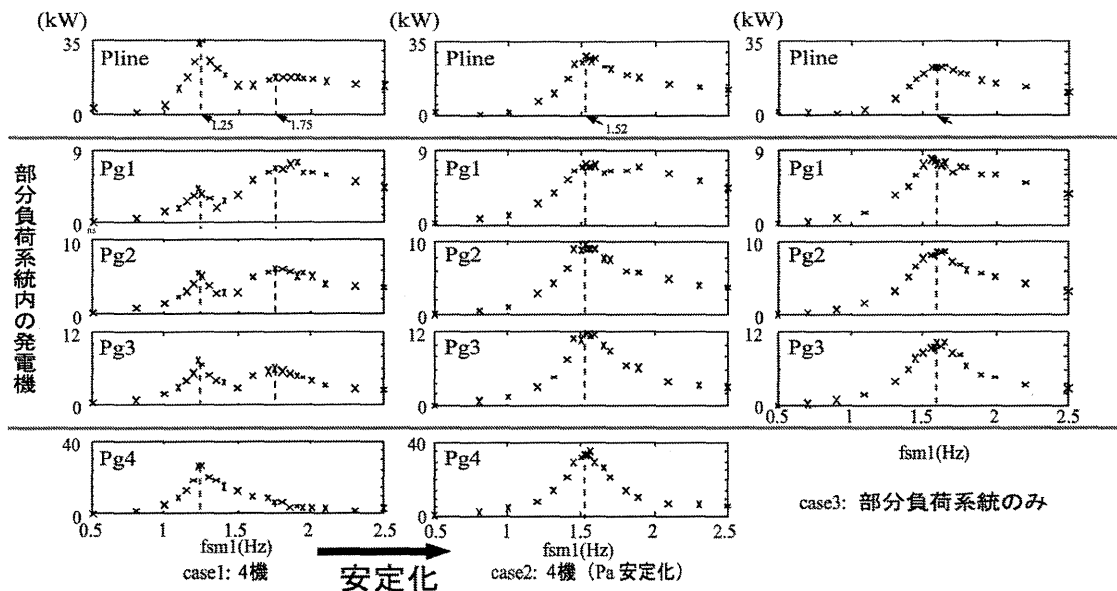


図 10 部分負荷系統の運転状態の抽出実験結果。SMES の潮流制御により動揺モードの制御、分離が行えている。

手法としては SMES 1 で系統に電力変動を与える。SMES2 は line a の電力変動が 0 になるように安定化制御を行う。この実験結果を図 10 に示す。全体系統の動揺モードは、G4 が支配的な低周期モードと部分負荷系統が支配的なモードが存在する (case1)。SMES2 で line a の電力変動を抑えること (case2) により、部分負荷系統のみのモード (case3) を抽出することができる。

2. 4 SMES を用いた負荷系統の自立運転への移行

分散型電源が負荷系統内に設置されることにより現行のシステムのままでは電力の品質、信頼性は低下することが推測されるが、需要家の中には高い品質、信頼性を求めているものもある。そこで事故が起こった際に SMES の電力制御の速応性を利用して制御を行うことにより、電力の過不足を補償することを考える。また事故除去後の再投入の際には SMES で電力を調整することによって同期投入を行わせる。この実験系統を図 11 に示す。実験結果を図 12 に示す。事故後、負荷系統内では電力が不足しているために SMES で制御を行わない場合では周波数が低下してしまっているが、SMES で制御を行った場合には SMES で補償しているため周波数を保つことができ、再閉路時においてもスムーズに投入することができる。

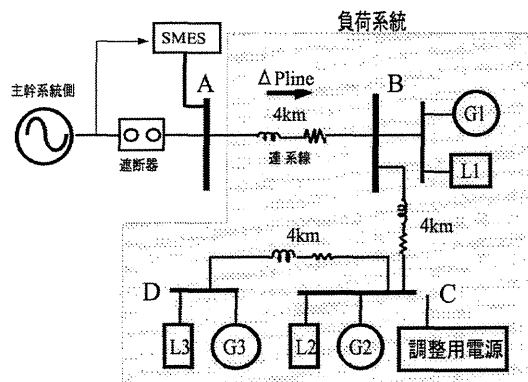


図 1 1 SMES を用いた自立運転への移行

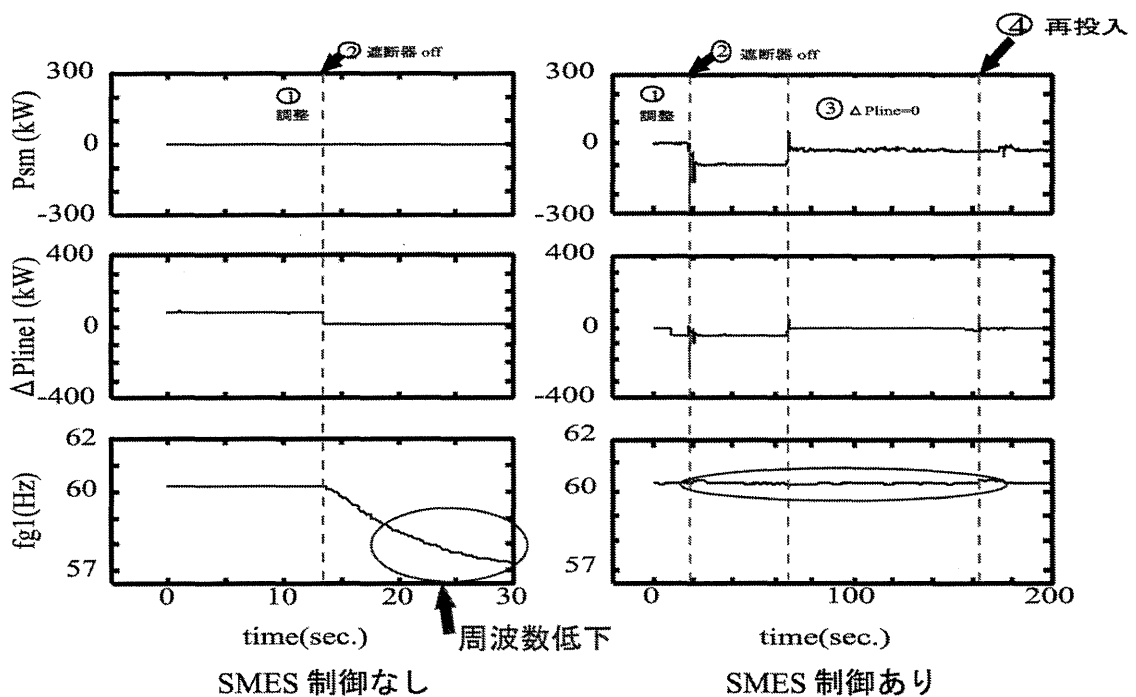


図 12 主系統からの潮流がある条件で解列。SMES 無しでは、周波数低下するが、SMES 有りでは、電力の過不足分補償を速やかに行い周波数を維持できる。再投入時も SMES の有効・無効電力制御により、電圧・周波数・位相調整をして安定な同期投入が来ている。

3. まとめ

本研究では SMES による分散電源を含む負荷系統の状態把握を提案し、チャープ信号を用いた負荷系統の状態把握について報告した。実験結果からはチャープ信号を用いた負荷系統の状態把握が可能であることが確認できた。しかも有効電力、無効電力を同時に制御したチャープ信号を用いる方法によると、系統に与える電圧変動の影響を小さく抑えたい

えで系統の状態を把握できる可能性が示された。さらにシステム同定の手法により、SMES のチャープ信号入力に対する負荷系統の伝達関数を求めることで、固有値の情報から負荷系統の運転状態を把握できることも示された。

また、非回転系発電機が配電系統に連系された場合の SMES を用いた配電系統の運転状態把握に関して、回転型あるいは非回転型分散型発電機の台数、設置位置・構成、配電系統の電圧分布、など様々な状態を考え、潮流、電圧、慣性による固有周波数の変化について考察し、SMES からの微小電力変動に対する配電系統の応答から、設置されている分散電源の構成や電圧プロファイルなど運用状態の把握がある程度可能で有用であることを模擬実験によって確認した。

さらに、上位系統での事故によって切り離されたときの SMES を用いた有効電力モデレーションによる単独運転検出、および高速電力制御機器による自立運転への移行実験などを行い、その有用性を確認した。

今後分散電源はますます増加するものと予想され、それにとまって分散電源を含む負荷系統の状態を把握することがますます重要な課題となると思われるが、提案した SMES による負荷系統の状態把握手法を用いれば系統運用に有用であると考ええる。得られた伝達関数をどのようなモデルとして負荷モデルに適用するかが今後の課題となる。